第38卷 第5期
2021年9月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 5
Sep. 2021

巴尔喀什湖流域土地利用/覆被变化过程与趋势

刘婉如[1,2]，陈春波[1]，罗格平[1,3,4]，何惠丽[1,4]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 新疆大学资源与环境科学学院，新疆 乌鲁木齐 830046；3. 中国科学院中亚生态与环境研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011；4. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：巴尔喀什湖流域是跨越中国新疆（境内）和哈萨克斯坦（境外）的重要流域。利用1970s、2005年和2015年3期土地利用/土地覆被（Land Use and Land Cover, LULC）数据与马尔科夫模型等方法，分析1972年流域内最大的水利工程卡普恰盖水库建成和前苏联解体以来流域LULC变化过程和趋势，并对比流域境内外差异，为该地区土地资源管理及生态环境保护提供依据。结果表明：巴尔喀什湖流域LULC变化呈现出耕地和林地面积先减后增（总体增加）、水域和未利用地面积先增后减（总体减少）、草地和城乡建设用地面积持续增加的变化趋势。这表明后期LULC变化对整个研究期LULC变化影响更大。以上变化以双向转换为主，因此，整个研究期内全流域变化过程始终处于平衡状态。境内外LULC类型结构和变化过程均不相同，境内分配比境外均匀，单一类型和区域LULC变化趋势与状态指数均表明境内LULC类型变化过程比境外稳定，但由于境外面积占全流域86%，主导了全流域LULC类型结构和变化过程。全流域在研究期内始终处于平衡状态。

关键词：巴尔喀什湖流域；土地利用/覆被变化；土地转移矩阵；时空变化

土地利用/土地覆被（Land Use and Land Cover，LULC）变化是全球变化的重要环节和主要原因之一，LULC变化会影响大气、土壤、植被、水资源与生物等自然要素，进而对生物地球化学循环、能量交换、水分循环以及生态过程产生广泛影响。因此，全球变化的各个方面与其都有一定联系[1-2]。全球环境变化日益威胁着人类及社会的可持续发展，许多国家和地区的区域环境恶化，已经严重影响了人类的生存和发展[3-5]，研究全球变化的人员越来越认识到LULC变化在全球环境变化过程中的重要性[6]。在LULC变化状况、驱动力与驱动机制、影响效应与作用机制以及模型模拟与土地可持续利用[7-11]等方面很多学者不断开展研究并取得了许多成果，但对巴尔喀什湖（简称巴湖）流域LULC变化研究相对较少。

巴湖流域是中亚著名跨境流域，巴湖的上游位于中国新疆境内（简称境内），其中游和下游部分位于哈萨克斯坦境内（简称境外）。20世纪60—80年代，在巴湖流域的境外部分，大力兴建水利工程、粗放扩大灌溉面积等不合理开发行为显著改变了巴湖流域LULC[12]。其中，1972年建成的卡普恰盖水库对流域LULC变化贡献突出。随后，1991年12月25日苏联正式宣布解体，哈萨克斯坦独立，从国家体制、管理方法到人民生产生活方式等都有相应改变，流域内LULC也随之改变。在巴湖流域的境内部分，中国于1978年底施行改革开放政策后，也同样进行较大规模的水土开发，引起LULC的显著变化。巴湖对中亚地区的气候调节起着重要作用[13]，巴湖与LULC密切关联的环境变化引起国内外学者的广泛关注，主要集中在巴湖水位呈周期性变化[14-15]，且水位变化与水体面积和水量的变化具有良好的一致性[16-19]；湖水位波动与流域气候[20-21]、降水[22]、径流[23]等因素有一定关系，但与LULC变化有关的人类活动也是水位变化的最重要因素。当湖水位下降显著时，将导致巴湖水质变差[24]、渔业安全性降低[25]、

收稿日期：2020-11-30；**修订日期：**2021-01-15
基金项目：中国科学院战略性先导科技专项资助（XDA20060302）
作者简介：刘婉如（1996-），女，硕士研究生，主要从事LUCC分析、遥感与GIS应用研究. E-mail: liuwanru_1109@outlook.com
通讯作者：罗格平. E-mail: luogp@ms.xjb.ac.cn

伊犁河三角洲生态环境恶化和荒漠化加剧[26-28]等问题，甚至在更大范围内对巴湖流域有显著的负面影响[12]。伊犁河是巴湖最大的水量补给河流，一些学者认为伊犁河上游的人类活动对中下游产生重要影响，有学者对巴湖境内部分的伊犁河谷LULC变化进行了研究[29]，但缺乏将巴湖流域作为一个整体的LULC变化分析。针对跨界流域，需要加强不同体制下流域LULC变化的整体研究和境内外对比研究，以充分认识人类活动和自然变化引起的LULC变化过程和趋势。

本文以中亚巴尔喀什湖流域为研究区，分析其土地利用/覆被变化过程与趋势。首先利用1970s、2005年和2015年3期LULC数据集对近45 a区域LULC分布变化做出定量描述；其次，对比整个流域和流域境内外LULC变化差异；最后总结LULC变化时空特征，分析巴尔喀什湖流域LULC变化的原因。相关成果将为巴尔喀什湖流域土地资源管理及生态环境保护提供依据，在管理和保护措施的制定上贡献有用信息。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

地处中亚干旱区的巴尔喀什湖流域（72°24′~85°E，42°11′15″~49°48′N）是哈萨克斯坦（境外）和中国（境内）的著名跨界流域，总面积为4.16×10^5 km^2。其中境外面积为3.59×10^5 km^2，约占流域总面积的86%；境内面积为0.57×10^5 km^2，主要分布在新疆西北部伊犁哈萨克自治州。巴湖流域以巴湖为中心向四周延伸，呈现出地势东南高西北低的盆地景观，最高处是汗腾格里峰，最低处在巴湖，是诸河尾闾。流域内光热资源充足，气温变幅大，蒸发能力强，降水稀少，属极端干旱的大陆性气候。年最高气温在7月达36 ℃，7月均温24~25 ℃；最低气温在1月达到零下40 ℃（历史上有零下52 ℃的记录），1月均温零下13~16 ℃[14]。在整个流域的地理环境中，垂直景观表现得十分鲜明，流域内依次分布着高山冰川带、亚高山草原带、森林草原带、半荒漠和荒漠草原带、绿洲、盐碱地和沙漠、湖泊和沼泽等[14]。

1.2　数据来源与处理

本文研究数据包括1970s、2005年和2015年中

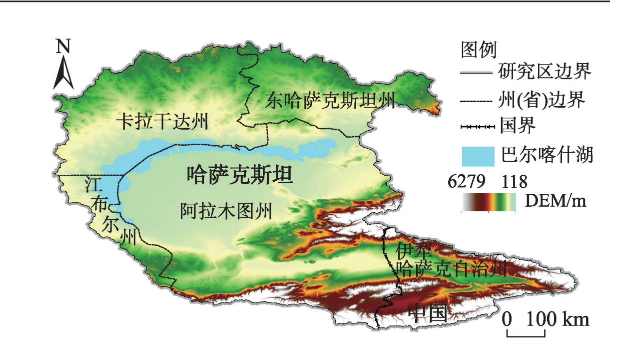


图1　研究区示意图

Fig. 1　The location of the study area

亚五国土地利用/覆被栅格数据集，由中国科学院新疆生态与地理研究所土地变化与生态模拟团队提供。根据国家国际科技合作专项课题技术报告“中亚地区土地利用变化及其对生态系统结构与功能的影响”（2015）中对课题的要求，该团队以欧空局300 m全球土地覆盖数据为基础，基于同期的Landsat MSS、TM/ETM遥感影像解译获得中亚五国1970s以及2005年的LULC数据，分类精度分别为85%和83%①。随后又按相关课题要求，基于Landsat 8 OLI数据解译将数据延伸10 a至2015年，分类精度为85%。其中1970s数据缺失较多，由1972—1978年数据（1977年居多）合成；2005年及2015年数据以当年数据为主，前后两年数据为辅合成。其空间分辨率分别为265 m、265 m和300 m，采用中国科学院土地利用分类系统[30]，包括了6个一级类和25个二级类。

巴尔喀什湖流域（巴湖流域）掩膜数据（mask）从Data Basin平台下载、数字高程数据（DEM）来自USGS Earth Explorer以及从BIGEMAP导出了行政边界数据等。

巴湖流域按照耕地、林地、草地、水域、城乡建设用地和未利用地6个一级类型空间分布。由于3期LULC数据分辨率不同，经重采样将3期栅格数据像元大小统一成300 m×300 m，便于后期面积统计及用地面积转移分析。最后利用研究区边界数据裁剪中亚LULC数据，得到巴尔喀什湖流域的LULC数据集。

1.3　研究方法

LULC变化过程可以通过LULC类型面积的变化来表征，这能够直观地反映研究时段内各类型的

① 国家国际科技合作专项课题技术报告“中亚地区土地利用变化及其对生态系统结构与功能的影响”，2015。

变化程度[7]。基于面积变化的LULC变化定量化参数有很多,土地利用转移矩阵是马尔科夫模型在土地利用变化方面的应用,来源于系统分析中对系统状态与状态转移的定量描述。矩阵不仅可以定量地表明不同土地利用类型之间的转化情况,还可以揭示不同土地利用类型间的转移速率,在LULC动态变化分析中被广泛使用。变化幅度、空间动态度、趋势和状态指数能够分别从单一LULC类型和区域整体两个角度定量分析LULC变化。因此本文选择以下几种指数,除土地利用转移矩阵外,其他指数均来自文献[7]。

1.3.1 土地利用转移矩阵 该方法反映研究时段内各土地利用类型的结构特征和面积之间相互转化的情况和方向,有助于了解研究初、末期LULC类型的流失动向和来源。其数学表达式为:

$$S_{ij}=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} (i,j=1,2,3,\cdots,n) \quad (1)$$

式中:S_{ij} 为 i 类用地转化成 j 类的面积($i=j$ 时表示某种土地利用类型未改变的面积);i 和 j 分别为转移前后的土地利用类型。n 为土地利用类型的数量(本文 $n=6$)。参考刘瑞等[31]对该方法的研究,本文为了便于理解与运用对该矩阵稍作改动。

1.3.2 单一LULC类型变化幅度 表示某种LULC类型在一定时间内面积上的变化程度,计算公式为:

$$\Delta U=\frac{U_b-U_a}{U_a}\times 100\% \quad (2)$$

式中:ΔU 为某种LULC类型变化幅度(%);U_a 为研究初期某一类型的面积(km²);U_b 为研究末期某一类型的面积(km²)。

1.3.3 单一LULC类型空间动态度 表示研究初、末期某种LULC类型在空间上面积的变化程度,计算公式为:

$$\Delta S=\frac{(\Delta U_{in}+\Delta U_{out})}{U_a}\times 100\% \quad (3)$$

式中:ΔS 为某种LULC类型空间动态度(值越大,表明该类型空间位置上面积变化越多);ΔU_{in} 为研究时段内其他LULC转化为某种类型面积的总和;ΔU_{out} 为研究时段内某种LULC转化为其他类型面积的总和。

1.3.4 单一LULC类型变化趋势与状态指数 表示研究期内某一类用地扩张或缩减的强度,在一定程度上反映其变化是否处于稳定状态。计算公式为:

$$P_s=\frac{\Delta U_{in}-\Delta U_{out}}{\Delta U_{in}+\Delta U_{out}},\ (-1\leqslant P_s\leqslant 1,\ 且\Delta U_{in}+\Delta U_{out}\neq 0) \quad (4)$$

式中:P_s 为某种LULC类型变化趋势与状态指数($P_s>0$ 说明该类型呈扩张态势;$P_s<0$ 呈缩减态势。值越接近于0,则该类型双向转换越频繁,越趋于平衡状态;绝对值越接近于1,越趋于不平衡状态,说明该类型以单向转入(出)为主,处于面积扩张(缩减)状态。

1.3.5 区域LULC变化趋势与状态指数 区域变化趋势与状态指数是在单一类型的基础上,对研究区内所有类型转入转出面积的计算,反映整个区域LULC变化的状态。计算公式为:

$$P_t=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left|\Delta U_{in}-\Delta U_{out}\right|}{\sum_{i=1}^{n}\Delta U_{in}+\Delta U_{out}},\ 0\leqslant P_t\leqslant 1 \quad (5)$$

式中:P_t 为区域LULC变化趋势与状态指数;P_t 越接近0,表明区域内所有LULC类型的双向转换频繁,呈现均衡转换的态势。越接近于1,说明每种LULC类型的转换方向主要为单向的不均衡转换。为了更好地表述和理解区域LULC变化的趋势和状态,对区域LULC变化的趋势和状态指数进行分级:平衡状态(0~0.25),准平衡状态(0.25~0.50),不平衡状态(0.50~0.75),极端不平衡状态(0.75~1)。

2 结果与分析

2.1 巴湖流域LULC分布状况

草地和未利用地始终是流域内面积最大的2种LULC类型,水域、耕地、林地次之,城乡建设用地最少。在研究期内(1970s—2015年),草地占比60%以上,主要分布在流域北部和东南部;未利用地占比23%~28%,主要分布在巴湖南面。水域占比约6%,是研究区内第3大利用类型,主要分布在流域的境外部分。耕地占比约5%,主要分布在东南部伊犁河沿岸。林地占比1.07%~1.43%,主要分布在流域内的部分山区。城乡建设用地最少,占比仅为0.35%~0.57%,主要分布在大片耕地的中心区域(图2,图3)。

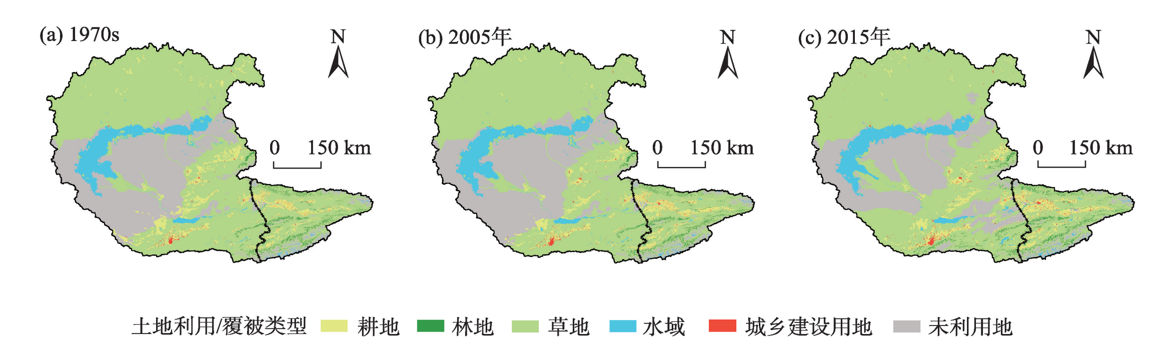


图2 1970s、2005年和2015年巴尔喀什湖流域土地利用/覆被类型空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land use and land cover in the Balkhash Lake basin in 1970s, 2005 and 2015

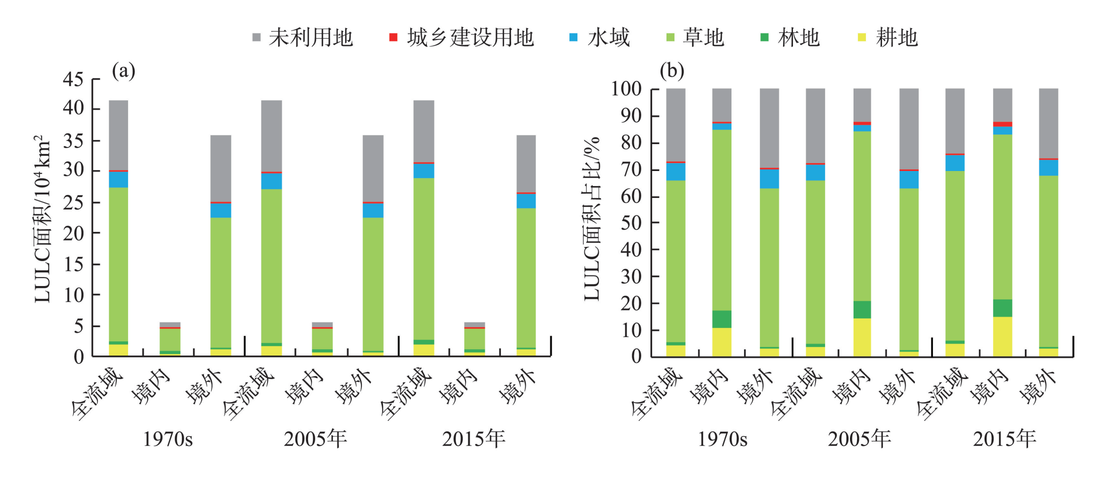


图3 1970s—2015年巴尔喀什湖流域土地利用/覆被类型面积结构

Fig. 3 Area structures of land use and land cover in the Balkhash Lake basin from 1970s to 2015

境内LULC类型分配比境外均匀,但境外面积更大,全流域LULC类型分配与境外一致。以2015年LULC类型面积占比为例,境内为草地(61%)>耕地(15%)>未利用地(12%)>林地(6.6%)>水域(2.7%)>城乡建设用地(1.5%),境外为草地(63%)>未利用地(25%)>水域(6.5%)>耕地(3.4%)>林地(0.6%)>城乡建设用地(0.4%)。境内外LULC分布均为草地最多,城乡建设用地最少,而其他4种类型相对大小不同。除草地外,境内以耕地和未利用地为主要覆被类型,境外则以未利用地和水域为主。从不同LULC类型的分配比例来看,境内比境外更均匀,但境外用地面积比境内面积大5倍以上,决定了整个流域的分配情况为草地(63%)>未利用地(24%)>水域(6%)>耕地(5%)>林地(1.4%)>城乡建设用地(0.6%)(图2,图3)。

2.2 巴湖流域LULC类型面积结构变化

整个研究期内(1970s—2015年),流域LULC类型面积结构变化显著(图2,图3)。在不同发展阶段(前期:1970s—2005年、后期:2005—2015年),LULC类型面积结构变化也不相同,且任意单一类型后期变化幅度大于前期变化幅度(表1,表2)。前期,除耕地、林地减少外,其他类型均增加。耕地面积骤减26.1×10^2 km^2,林地仅减少0.13×10^2 km^2(表2),减少幅度分别为12.58%和0.29%(表1)。城乡建设用地增加最显著,增幅为17.31%,草地、水域和未利用地增幅均不足2%。后期,除水域、未利用地减少外,其他类型均增加。水域和未利用地分别减少14.7×10^2 km^{2}和154×10^2 km^2,减少幅度分别为5.54%和13.43%。耕地和林地在前期减少的基础上呈增加趋势,增幅分别为16.05%和32.58%。草地和城乡建设用地面积在前期增加的基础上继续增加,增幅分别为4.72%和40.94%。整个研究期内,草地、城乡建设用地持续增加,面积占比分别由初始的60.03%和0.35%增加到63.04%和0.57%。耕地和林地经历了先减少后增加的变化过程,面积整体呈现增加趋势。水域和未利用地则经历了先增加后减

表1 巴尔喀什湖流域土地利用/覆被动态变化

Tab. 1 Dynamic changes of land use/cover in the Balkhash Lake basin

		1970s—2005年			2005—2015年			1970s—2015年		
		ΔU /%	ΔS /%	P_s / P_t	ΔU /%	ΔS /%	P_s / P_t	ΔU /%	ΔS /%	P_s / P_t
耕地	全流域	−12.58	49.82	−0.25	16.05	63.58	0.25	1.45	81.84	0.02
	境内	30.79	54.32	0.57	5.39	46.05	0.12	37.84	84.35	0.45
	境外	−31.68	47.83	−0.66	25.04	78.36	0.32	−14.57	80.73	−0.18
林地	全流域	−0.29	71.46	0.00	32.58	149.27	0.22	32.19	156.61	0.21
	境内	−0.35	81.27	0.00	4.83	128.04	0.04	4.47	136.08	0.03
	境外	0.00	31.02	0.00	146.95	236.74	0.62	146.95	241.51	0.61
草地	全流域	0.28	6.59	0.04	4.72	27.58	0.17	2.87	29.69	0.17
	境内	−5.69	19.99	−0.28	−3.10	30.00	−0.10	−8.61	34.31	−0.25
	境外	1.36	4.17	0.33	6.05	27.17	0.22	7.49	28.85	0.26
水域	全流域	1.64	11.01	0.15	−5.54	27.98	−0.20	−3.99	29.36	−0.14
	境内	6.56	87.73	0.07	11.10	120.36	0.09	18.39	138.29	0.13
	境外	1.39	6.94	0.20	−6.46	22.81	−0.28	−5.15	23.56	−0.22
城乡建设用地	全流域	17.31	74.38	0.23	40.94	127.38	0.32	65.35	165.68	0.39
	境内	26.08	116.83	0.22	36.98	170.30	0.22	72.70	228.62	0.32
	境外	12.75	52.24	0.24	43.25	102.37	0.42	61.51	132.87	0.46
未利用地	全流域	1.09	4.89	0.22	−13.43	43.15	−0.31	−12.48	43.26	−0.29
	境内	0.18	34.06	0.01	1.59	63.93	0.02	1.77	70.60	0.03
	境外	1.15	2.95	0.39	−14.45	41.78	−0.35	−13.46	41.43	−0.32
整个区域	全流域	–	–	0.13	–	–	0.23	–	–	0.19
	境内	–	–	0.24	–	–	0.08	–	–	0.21
	境外	–	–	0.43	–	–	0.29	–	–	0.28

注:将P_t与P_s值表示成一列,1~18行表示不同区域不同用地类型的P_s,19~21行代表整个流域、境内部分以及境外部分的P_t。

少的变化过程,面积整体呈现减少趋势。

流域境外部分LULC变化过程主导全流域LULC变化过程。境外仅耕地在整个研究期变化趋势与全流域有差异,其他类型变化趋势在3个时段均与全流域表现一致。全流域耕地面积占比呈现由4.99%先减少后增加至16.06%的增加趋势,而境外则呈现由4.02%先减少后增加至3.43%的减少趋势。流域境内部分仅林地和城乡建设用地与全流域变化过程完全相同,其他类型均有不同程度的差异。境内耕地、水域和未利用地呈现出持续增加的态势,所占比例分别由11.15%增至15.37%、2.29%增至2.71%、12.35%增至12.57%,而草地面积占比由67.01%持续减少至61.24%。

2.3 不同时期巴湖流域LULC类型的转换规律

运用ArcGIS的空间叠加分析得到1970s—2005年(前期)、2005—2015年(后期)和1970s—2015年(整个研究期)的土地利用转化空间分布图(图4)以及全流域(表2)和境内外(表3,表4)土地利用转移矩阵,定量描述不同土地利用类型间的转化情况和方向。

巴湖流域LULC类型间的转换以草地与耕地、林地、水域和未利用地间的双向转化为主,且伴随着耕地与未利用地间较明显的单向转化。此外,不同时期的覆被转换也不相同,后期(2005—2015年)变化关系比前期(1970s—2005年)复杂,任意类型的空间动态度(ΔS)也比前期剧烈,从而对整个研究期(1970s—2015年)的影响更大(表1,表2和图4)。整个研究期内LULC类型间转换面积与ΔS均大于前、后两个时期,表明LULC在空间上的面积转换有一定的时间累加效应。

前期草地与耕地、林地和未利用地之间以双向转化为主,转化面积均超过15×10^2 km^2。其中,草地与林地和未利用地之间的转化基本持平,而耕地转为草地的面积(48×10^2 km^2)远大于草地转向耕地的

表2 巴尔喀什湖流域土地利用转移矩阵

Tab. 2 Land use transfer matrix in the Balkhash Lake basin

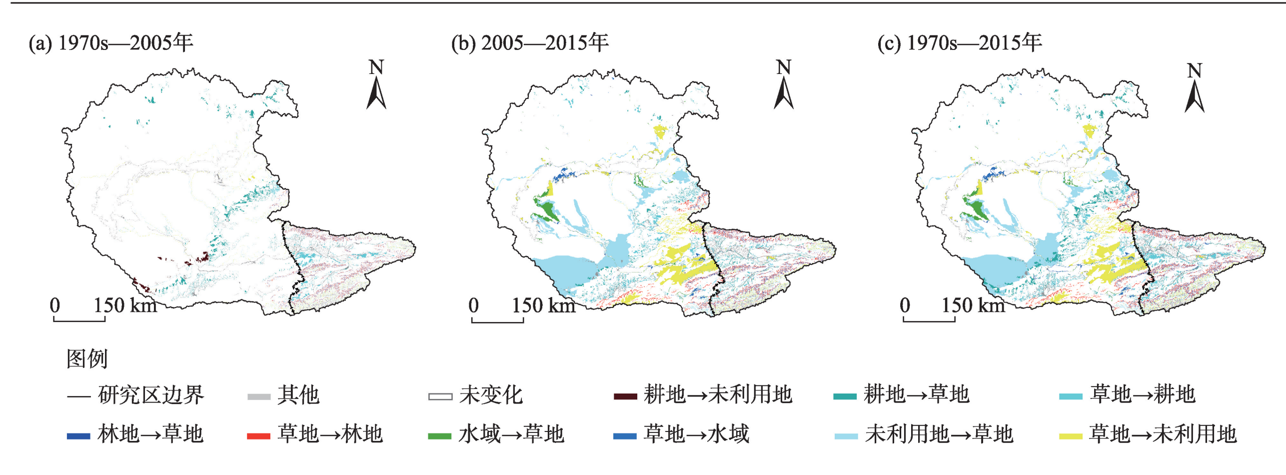
$/10^2$ km^2

时段	土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	城乡建设用地	未利用地	合计	ΔU_{out}
1970s—2005年	耕地	143	0	48	1	4	11	208	65
	林地	0	29	15	0	0	0	45	16
	草地	35	15	2421	9	2	17	2500	79
	水域	1	0	6	248	0	5	260	12
	城乡建设用地	2	0	2	0	10	0	14	4
	未利用地	1	0	15	6	0	1116	1137	22
	合计	182	45	2507	264	17	1150	4164	–
	ΔU_{in}	39	16	86	16	7	34	–	–
2005—2015年	耕地	139	0	33	1	7	1	182	43
	林地	0	19	25	0	0	1	45	26
	草地	63	40	2220	18	7	159	2507	287
	水域	1	0	33	220	0	9	264	44
	城乡建设用地	5	0	2	0	10	0	17	7
	未利用地	4	0	311	10	0	824	1150	325
	合计	211	59	2625	250	24	995	4164	–
	ΔU_{in}	72	41	405	30	14	171	–	–
1970s—2015年	耕地	124	0	72	1	8	2	208	84
	林地	0	17	26	0	0	1	45	28
	草地	77	41	2191	20	8	162	2500	308
	水域	1	0	32	217	0	10	260	43
	城乡建设用地	4	0	2	0	7	0	14	7
	未利用地	3	0	302	11	0	820	1137	317
	合计	211	59	2625	250	24	995	4164	–
	ΔU_{in}	87	42	434	33	17	175	–	–

注：合计为某一时间一种土地类型的总面积(行、列分别表示初、末期)，分别等于 $\sum_{j=1}^{n} S_{1j}$ 、$\sum_{i=1}^{n} S_{i1}$ ；初期面积减去不变的面积表示转出面积(ΔU_{out})；末期面积减去不变的面积表示转入面积(ΔU_{in})，0不表示没有转化面积，只是转化不明显，面积不足0.5×10^2 km^2。下同。

面积(35×10^2 km^2)，加上耕地有11×10^2 km^{2}转为未利用地，前期耕地面积骤减，减少区域集中在流域北部以及中部。后期以草地与耕地、林地、水域和未利用地之间的双向转化为主，转化面积均超过18×10^2 km^2。对比表3中转化面积数据，草地的增加主要来源于未利用地(140×10^2 km^2)与水域(12×10^2 km^2)，而面积减少部分主要转换为耕地(5×10^2 km^2)和林地(15×10^2 km^2)。这些变化集中在伊犁河流域中下游以及巴湖周围。整个研究期内，除耕地在前期面积骤减的基础上增加幅度小于后期外，LULC变化与后期变化基本一致。

境内外LULC类型分布状况以及面积结构变化不同，土地利用类型间的转化关系也存在明显差异。从图2可以看出，境外的变化主要为草地与未利用地、水域之间的转化以及耕地转出为草地、未利用地，而境内的变化主要为草地与林地之间的转化以及草地转为耕地。通过分析表3和表4中转化面积数据，境内外的差异主要表现在耕地、林地、草地和水域的变化上。境外前期耕地面积骤减45×10^2 km^2，主要转为草地(78.9%)和未利用地(19.3%)；后期林地面积增加13×10^2 km^2，草地增加150×10^2 km^2，均来源于草地；且水域的变化集中在境外，主要在巴尔喀什湖周围以及伊犁河三角洲区域。境内耕地面积持续增长，空间上也没有明显转出；林地与草地、草地与未利用地间面积转化基本持平，面积上变化不明显；境内外LULC类型间转换面积与ΔS表现情况与全流域相同，为整个研究期>后期>前期，进一步证明了流域内LULC在空间上面积转换



注：图中未展示所有的转化类型，图a和图b中仅展示变化面积大于1×10² km²的类型，图c展示了变化面积大于21×10² km²的类型，未变化指土地利用类型不变的面积，其他指除图中展示的变化类型以外的变化类型。

图4 巴尔喀什湖流域土地利用转移空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of land use transfer in the Balkhash Lake basin

表3 巴尔喀什湖流域境外部分土地利用转移矩阵

Tab. 3 Land use transfer matrix in Kazakhstan

/10² km²

时段	土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	城乡建设用地	未利用地	合计	ΔU_{out}
1970s—2005年	耕地	87	0	45	0	2	11	144	57
	林地	0	7	1	0	–	0	9	1
	草地	11	1	2087	8	1	9	2117	30
	水域	0	0	5	240	0	2	247	7
	城乡建设用地	1	–	1	0	8	0	9	2
	未利用地	1	0	7	2	0	1056	1066	10
	合计	99	9	2146	250	11	1078	3592	–
	ΔU_{in}	12	1	59	10	3	22	–	–
2005—2015年	耕地	72	0	23	0	2	1	99	26
	林地	0	5	4	0	–	0	9	4
	草地	47	17	1919	16	5	142	2146	227
	水域	0	0	32	214	0	5	250	37
	城乡建设用地	1	0	2	0	8	0	11	3
	未利用地	3	0	296	5	0	775	1078	303
	合计	123	22	2276	234	15	922	3592	–
	ΔU_{in}	51	17	356	20	8	147	–	–
1970s—2015年	耕地	76	0	64	0	3	1	144	69
	林地	0	5	4	–	–	0	9	4
	草地	44	17	1891	17	6	142	2117	226
	水域	0	0	30	211	0	5	247	35
	城乡建设用地	1	0	2	0	6	0	9	3
	未利用地	2	0	285	5	0	773	1066	293
	合计	123	22	2276	234	15	922	3592	–
	ΔU_{in}	48	17	385	23	9	149	–	–

表4 巴湖流域境内部分土地利用转移矩阵

Tab. 4 Land use transfer matrix in China

/10² km²

时段	土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	城乡建设用地	未利用地	合计	ΔU_{out}
1970s—2005年	耕地	56	0	4	1	3	0	64	7
	林地	0	21	14	0	0	0	36	15
	草地	24	14	333	2	1	8	382	49
	水域	1	0	1	8	0	3	13	5
	城乡建设用地	2	0	0	0	3	0	5	2
	未利用地	0	0	8	3	0	58	70	12
	合计	83	36	360	14	6	71	570	–
	ΔU_{in}	27	15	27	6	4	12	–	–
2005—2015年	耕地	66	0	10	1	5	1	83	17
	林地	0	14	21	0	0	1	36	22
	草地	16	23	301	2	2	17	360	60
	水域	1	0	2	6	0	5	14	8
	城乡建设用地	3	0	1	0	2	0	6	4
	未利用地	1	0	15	6	0	49	71	22
	合计	88	38	349	15	9	72	570	–
	ΔU_{in}	21	24	48	9	6	23	–	–
1970s—2015年	耕地	49	0	8	1	5	1	64	15
	林地	0	12	22	0	0	1	36	24
	草地	33	24	300	3	2	19	382	82
	水域	1	0	2	5	0	5	13	8
	城乡建设用地	3	0	1	0	1	0	5	4
	未利用地	1	0	17	6	0	46	70	24
	合计	88	38	349	15	9	72	570	–
	ΔU_{in}	39	25	49	10	7	25	–	–

的时间累加效应。

3 讨论

由于巴尔喀什湖流域面积较大，解译耗费大量时间精力，本研究仅用已有的3期LULC数据集对研究区做出分析。虽然时间跨度较大，但能在一定程度上定量解释45 a来该流域LULC变化过程与趋势。45 a来，巴湖流域境外部分经历了大规模水土开发、前苏联解体、哈萨克斯坦独立后国家内部进行制度改革的巨大变化，境内部分也经历了改革开放政策的洗礼，显著改变了巴湖流域LULC。流域内LULC变化以双向转化为主，但耕地受政策影响显著，一些单向转化表现突出。1970s卡普恰盖水库的建立发展了45×10² km²耕地[12]，而1991年末前苏联解体后，哈萨克斯坦成为独立国，推行以私有化为先导的农村改革，导致个别国营和私人农场因无人经营而撂荒[32-33]，境外耕地面积从144×10² km²减少到99×10² km²，减去草地转入面积，仍向草地转出34×10² km²，同时向未利用地转出11×10² km²。随后10 a间(1998—2008)，为深化土地改革任务、完善土地关系，境外就土地工作制定和实行了50部方法、指南和命令[34]，2003年出台的包括"关于按行政区单位批准农用土地地段优惠价格数额"的决议和"关于批准由于征用和林业用地，将其用于同农业和林业无关目的，而对农业和林业生产损失的补偿标准和算上恢复土地所花费用对农业生产损失补偿规则"的决议在内的一系列的土地私有化具体规定、决议与措施等在较大范围内鼓励公民、法人、责任人等对农业生产进行投资，促进了农用地的复垦、开发[33]，使境外24×10² km²草地转变为耕地，且耕地面积从182×10² km²增加到211×10² km²，这与朱磊等[35]的研究结果一致。而境内部分在改革开放的推动下，耕地面积持续增长24×10² km²，主要来源

于草地。从表1中耕地的变化趋势与状态指数(P_s)来看,境内耕地持续增加以及境外后期耕地复垦基本抵消了境外耕地前期的缩减,使流域内耕地处于0.02的稳定状态。

研究区处于降水少而蒸发剧烈的干旱区,年降水低于150 mm[36],蒸发量为降水的数倍,取值范围在110~1000 mm[19,37]。因此,耕地很大程度地依赖于灌溉,分析结果表明水域和耕地的变化趋势完全相反。耕地减少时,水域从$260×10^2$ km^2增加至$264×10^2$ km^2;随着耕地增加,水域减少至$250×10^2$ km^2。水域的变化与巴湖面积的变化有很大关系,如表2和图4所示,巴湖周围有$9×10^2$ km^2水域转化为未利用地,且伊犁河三角洲位置的水域向草地转化明显,可推断出巴湖面积有所减小。据臧菁菁等[16]的研究,巴湖面积在卡普恰盖水库10 a注水及后续恢复阶段波动减少,本文研究结果与之一致。从水域的变化趋势与状态指数来看,后期缩减0.2大于前期增加0.15,说明水域未来有继续缩减的趋势,流域内水资源保护工作刻不容缓。但由于现有研究数据时间间隔较长,对研究期内的LULC变化研究的程度有限,不能针对特殊时期的情况详细进行解释说明。因此对巴尔喀什湖流域的LUCC问题的研究还有待更多的数据支持,进一步发现问题并找到解决途径。

此外,境内外人口从$3.1×10^6$增长至$6.58×10^6$[38],城乡建设用地相应的从$14.4×10^2$ km^2扩张至$23.8×10^2$ km^2。整个研究期内,作为流域内面积最小的用地类型,城乡建设用地的变化趋势与状态指数却最大(0.39),表明变化最剧烈。其次是未利用地(-0.29)和林地(0.21)变化较剧烈,面积最大的草地变化较稳定,变化趋势与状态指数为0.17。从表1中不难看出,无论是单一类型P_s还是境内外区域LULC变化趋势与状态指数P_t,境外均大于境内,说明在研究期内境内LULC变化趋势一直比境外稳定。对整个流域而言,单一LULC类型变化趋势与状态指数表明巴湖流域在平衡和准平衡状态下发展,而变化最剧烈的城乡建设用地面积最少,面积最多的草地稳定变化使整个流域始终处于稳定变化状态(区域LULC变化趋势与状态指数P_t在不同时期分别为:前期0.13、后期0.23、整个研究期0.19)。

4 结 论

本文以巴尔喀什湖流域为研究区,采用1970s、2005年和2015年3期LULC数据,分析了1972年流域内最大的水利工程卡普恰盖水库建成和前苏联解体以来流域LULC变化过程和趋势,并对比流域内哈萨克斯坦和中国部分(境内外)差异,得到以下结论:

(1) 草地和未利用地始终是流域内所占比例最大的2种LULC类型,累计占比超过85%。境外两种类型占比超过87%,比境内高出10%。流域内城乡建设用地最少,仅占0.35%~0.57%。水域主要分布在境外,水域作为研究区内第三大利用类型,所占比例仅6%左右。林地主要分布在境内,境内耕地比例高于境外。

(2) 不同发展阶段和社会经济体制下,LULC类型变化也不相同。耕地和林地经历了先减少后增加的变化过程,面积整体呈现增加趋势。草地和城乡建设用地在研究期内持续增加,面积占比分别由60.03%和0.35%增长到63.04%和0.57%。水域和未利用地的变化过程与耕地和林地完全相反,研究期内面积呈减少趋势。境外仅耕地在1970s—2015年变化趋势与全流域有差异,而境内仅林地和城乡建设用地与全流域变化相同。

(3) 全流域LULC变化过程以双向转换为主,后期LULC类型空间上面积转换比前期多。且整个研究期内ΔS高于前两个时期,表明该流域LULC在空间上的面积转化有一定的时间累加效应。P_s和P_t均表明境内LULC变化过程比境外LULC变化过程稳定。境外LULC变化在准平衡范围内,但由于境内相对稳定的LULC变化,全流域在研究期内LULC变化始终处于平衡状态。

参考文献(References):

[1] 孔祥伦, 李云龙, 韩美, 等. 1986—2016年黄河三角洲土地利用/覆被变化及景观格局分析[J]. 西南林业大学学报(自然科学版), 2020, 40(4): 122-131. [Kong Xianglun, Li Yunlong, Han Mei, et al. Analysis of land use/cover change and landscape pattern in the yellow river delta during 1986-2016[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences Edition), 2020, 40(4): 122-131.]

[2] 白娥, 薛冰. 土地利用与土地覆盖变化对生态系统的影响[J]. 植物生态学报, 2020, 44(5): 543-552. [Bai Er, Xue Bing. A review of influences of land use and land cover change on ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(5): 543-552.]

[3] 杨玉盛. 全球环境变化对典型生态系统的影响研究: 现状、挑战与发展趋势[J]. 生态学报, 2017, 37(1): 1-11. [Yang Yusheng. The impacts of global environmental changes on typical ecosystems: Status, challenges and trends[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(1): 1-11.]

[4] 王文涛, 刘燕华, 于宏源. 全球气候变化与能源安全的地缘政治[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1259-1267. [Wang Wentao, Liu Yanhua, Yu Hongyuan. The geopolitical pattern of global climate change and energy security issues[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(9): 1259-1267.]

[5] Krishna P V, Vadrevu K P, Ohara T. Focus on land use cover changes and environmental impacts in South/Southeast Asia[J]. Envirmental Research Letters, 2020, 15(10): 100201.

[6] 张新荣, 刘林萍, 方石, 等. 土地利用/覆被变化(LUCC)与环境变化关系研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(12): 2013-2021. [Zhang Xinrong, Liu Linping, Fang Shi, et al. Research advances on the relationship between land use/cover change and environmental change[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(12): 2013-2021.]

[7] 张琪, 罗格平, 李龙辉, 等. 基于土地利用/覆被变化表征的现代绿洲演变过程——以天山北坡三工河流域为例[J]. 地理学报, 2016, 71(7): 1157-1171. [Zhang Qi, Luo Geping, Li Longhui, et al. Modern oasis evolution analysis based on land-use and land-cover change: A case study in Sangong River Basin on the northern slope of Tianshan Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(7): 1157-1171.]

[8] Guyassa E, Amaury F, Sil L, et al. Changes in land use/cover mapped over 80 years in the Highlands of Northern Ethiopia[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(10): 1538-1559.

[9] 于兴修, 杨桂山, 王瑶. 土地利用/覆被变化的环境效应研究进展与动向[J]. 地理科学, 2004, 24(5): 627-633. [Yu Xingxiu, Yang Guishan, Wang Yao. Advances in researches on environmental effects of land use/cover change[J]. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(5): 627-633.]

[10] 华文剑, 陈海山, 李兴. 中国土地利用/覆盖变化及其气候效应的研究综述[J]. 地球科学进展, 2014, 29(9): 1025-1036. [Hua Wenjian, Chen Haishan, Li Xing. Review of land use and land cover change in China and associated climatic effects[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(9): 1025-1036.]

[11] 史晓亮, 李颖, 严登华, 等. 流域土地利用/覆被变化对水文过程的影响研究进展[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 301-308. [Shi Xiaoliang, Li Ying, Yan Denghua, et al. Advances in the impacts of watershed land use/cover change on hydrological processes[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(4): 301-308.]

[12] 付颖昕, 杨恕. 苏联时期哈萨克斯坦伊犁—巴尔喀什湖流域开发述评[J]. 兰州大学学报(社会科学版), 2009, 37(4): 16-24. [Fu Yingxin, Yang Shu. Commentary on the development of Kazakhstan Ili-Balkhash Basin during the Soviet period[J]. Journal of Lanzhou University(Social Sciences Edition), 2009, 37(4): 16-24.]

[13] 肖婷婷, 夏自强, 郭利丹, 等. 巴尔喀什湖流域1936—2005年气温特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 391-396. [Xiao Tingting, Xia Ziqiang, Guo Lidan, et al. Temperature characteristics in the Balkhash Lake Basin from 1936 to 2005[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences Edition), 2011, 39(4): 391-396.]

[14] 杨川德. 巴尔喀什湖水位变化及其原因[J]. 干旱区地理, 1993, 16(1): 36-42. [Yang Chuande. Changes in the water level of Lake Balkhash and its causes[J]. Arid Land Geography, 1993, 16(1): 36-42.]

[15] 邓铭江, 王志杰, 王姣妍. 巴尔喀什湖生态水位演变分析及调控对策[J]. 水利学报, 2011, 42(4): 403-413. [Deng Mingjiang, Wang Zhijie, Wang Jiaoyan. Analysis of Balkhash Lake ecological water level evolvement and its regulation strategy[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(4): 403-413.]

[16] 臧菁菁, 李国柱, 宋开山, 等. 1975—2014年巴尔喀什湖水体面积的变化[J]. 湿地科学, 2016, 14(3): 368-375. [Zang Jingjing, Li Guozhu, Song Kaishan, et al. Change of water area of Lake Balkhash during 1975-2014[J]. Wetland Science, 2016, 14(3): 368-375.]

[17] 高彦华, 王洪亮, 周旭, 等. 巴尔喀什湖近30余年动态变化遥感监测与分析[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(1): 102-106. [Gao Yanhua, Wang Hongliang, Zhou Xu, et al. Remote sensing monitoring and analysis of the dynamic changes of Balkhash Lake in the past 30 years[J]. Environment and Sustainable Development, 2016, 41(1): 102-106.]

[18] Aibek Z, Kamshat T, Ronny B. Water in Kazakhstan, a key in Central Asian water management[J]. Hydrological Sciences Journal, 2018, 63(5): 752-762.

[19] 龙爱华, 邓铭江, 谢蕾, 等. 巴尔喀什湖水量平衡研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1341-1352. [Long Aihua, Deng Mingjiang, Xie Lei, et al. A study of the water balance of Lake Balkhash[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1341-1352.]

[20] 郭利丹, 夏自强, 李捷, 等. 巴尔喀什湖流域气候变化特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 52(3): 316-321. [Guo Lidan, Xia Ziqiang, Li Jie, et al. Characteristics of climatic change in the Balkhash Lake Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences Edition), 2008, 52(3): 316-321.]

[21] 张潇, 夏自强, 郭利丹, 等. 1960—2010年巴尔喀什湖流域干湿特征分析[J]. 资源科学, 2016, 38(6): 1118-1128. [Zhang Xiao, Xia Ziqiang, Guo Lidan, et al. Analysis of aridity-wetness characteristics in the Balkhash Lake Basin from 1960 to 2010[J]. Resources Science, 2016, 38(6): 1118-1128.]

[22] 周文婧, 夏自强, 黄峰, 等. 巴尔喀什湖流域降水量及其年内分配的变化特征[J]. 水电能源科学, 2013, 31(6): 10-13. [Zhou

Wenjing, Xia Ziqiang, Huang Feng, et al. Variation characteristics of precipitation and its annual distribution in Balkhash Lake Basin [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(6): 10−13.]

[23] 王宙. 巴尔喀什湖流域径流变化特征分析[J]. 水利科技与经济, 2012, 18(5): 53−58. [Wang Zhou. Analysis of runoff variation characteristics in Balkhash Lake Basin[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2012, 18(5): 53−58.]

[24] Nurtazin S, Pueppke S, Ospan T, et al. Quality of drinking water in the Balkhash district of Kazakhstan's Almaty region[J]. Water, 2020, 12(2): 392.

[25] Marat K, Pedro R, Zenaida S M, et al. The water-energy-food nexus in Kazakhstan: Challenges and opportunities[J]. Energy Procedia, 2017, 125: 63−70.

[26] 谢蕾, 龙爱华, 邓铭江, 等. 伊犁河下游三角洲生态耗水研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1330−1340. [Xie Lei, Long Aihua, Deng Mingjiang, et al. Study on ecological water consumtion in delta of the lower reaches of Ili River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1330−1340.]

[27] Mukhitdinov A, Nurtazin S, Alimova S, et al. The transformation of ecosystems of the Ili River delta (Kazakhstan) under the flow regulation and climate change[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2020, 18(2): 2483−2498.

[28] Aiman I, Niels T, Sebastian S, et al. Vegetation, fauna, and biodiversity of the Ile Delta and southern Lake Balkhash: A review[J]. Journal of Great Lakes Research, 2015, 41(3): 688−696.

[29] 马艳. 伊犁河谷地西部区域土地利用变化及驱动力研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2011. [Ma Yan. The Land Use Change and the Driving Forces of Ili River Valley[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2011.]

[30] 刘纪远. 国家资源环境遥感宏观调查与动态监测研究[J]. 遥感学报, 1997, 12(3): 225−230. [Liu Jiyuan. Study on national resources and environment survey and dynamic monitoring using remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 12(3): 225−230.]

[31] 刘瑞, 朱道林. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1544−1550. [Liu Rui, Zhu Daolin. Methods for detecting land use changes based on the land use transition matrix[J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1544−1550.]

[32] Kirsten M, Geoffrey M H. Land surface phenology, climatic variation, and institutional change: Analyzing agricultural land cover change in Kazakhstan[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4): 497−509.

[33] Henebry G M, de Beurs K M, Gitelson A A. Land surface dynamics in Kazakhstan: Dynamic baselines and change detection[J]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002, 2: 1060−1062.

[34] 刘燕平. 哈萨克斯坦土地管理机构及法律法规[J]. 国土资源情报, 2008, 9(3): 22−25. [Liu Yanping. Kazakhstan land administration agencies and laws and regulations[J]. Land and Resources Information, 2008, 9(3): 22−25.]

[35] 朱磊, 罗格平, 陈曦, 等. 伊犁河中下游近40年土地利用与覆被变化[J]. 地理科学进展, 2010, 29(3): 292−300. [Zhu Lei, Luo Geping, Chen Xi, et al. Detection of land use/land cover change in the middle and lower reaches of the Ili River, 1970s−2007[J]. Progress in Geography, 2010, 29(3): 292−300.]

[36] 胡增运, 胡汝骥, 周启鸣, 等. 亚洲中部干旱区干湿时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 260−268. [Hu Zengyun, Hu Ruji, Zhou Qiming, et al. Spatiotemporal variation of wetting or drying in the arid regions in Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 260−268.]

[37] 梁红闪, 王丹, 郑江华. 伊犁河流域地表蒸散量时空特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 100−110. [Liang Hongshan, Wang Dan, Zheng Jianghua. Temporal and spatial characteristics of surface evapotranspiration in the Ili River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 100−110.]

[38] Liu Shuang, Luo Geping, Wang Hao. Temporal and spatial changes in crop water use efficiency in Central Asia from 1960 to 2016 [J]. Sustainability, 2020, 12(2): 572.

Change processes and trends of land use/cover in the Balkhash Lake basin

LIU Wanru[1,2], CHENG Chunbo[1], LUO Geping[1,3,4], HE Huili[1,4]

(1. Stake Kay Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 3. Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Balkhash Lake basin is an important transboundary basin spanning China's Xinjiang region (domestic) and Kazakhstan (overseas). Existing since 1972, the Kapuchagai Reservoir, which is the largest water conservancy project within the Balkhash Lake basin has experienced different stages of ecological change, especially since the collapse of the Soviet Union. This study analyzed three periods in which change occurred and trends in Land Use and Land Cover (LULC) starting from the 1970s, 2005 and year 2015, using the Markov model and other methods. Moreover, the differences between internal and external basin characteristics where identified and compared. The results showed that, in the Balkhash Lake basin, LULC changed; both cultivated and wood lands initially showed a decreasing trend between the 1970s and 2005, then an increasing trend afterward (2005−2015). In contrast, the change processes observed in water areas and unused lands showed a completely opposite trend. In addition, grassland and urban land uses maintained a steady increasing trend. This indicates that later changes in LULC had a greater impact on the overall LULC changes throughout the study period. These changes mainly assume a two-way conversion process, so the change process of the whole river basin was always in equilibrium during the study period. The structure and change process of LULC types outside and inside were different: Internal land use types were more evenly distributed than those located externally, and both the single type and regional LULC variation in trends, and the status index indicated that the domestic change process was more stable than that outside the watershed. However, because the external area accounted for 86% of the entire river basin, it dominated the structure and change process of LULC types in the whole area. This study provides a basis for sustainable land resource management and ecological environment protection in the region.

Keywords: Balkhash Lake basin; land use/cover change; land transfer matrix; spatio-temporal changes